

μ SR Study of Cu-Spin Fluctuations in Hole- and Electron-Doped High-Tc Superconducting Cuprates

著者	RISD IANA
号	50
学位授与番号	3571
URL	http://hdl.handle.net/10097/37239

氏 名	リスディアナ
授 与 学 位	RISDIANA 博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成18年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 応用物理学専攻
学 位 論 文 題 目	μ SR Study of Cu-Spin Fluctuations in Hole- and Electron-Doped High- T_c Superconducting Cuprates (ホール型および電子型銅酸化物高温超伝導体における銅スピンゆらぎの μ SRによる研究)
指 導 教 員	東北大学教授 小池 洋二
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 梶谷 剛 東北大学教授 佐久間 昭正

論 文 内 容 要 旨

1. Introduction

Although the mechanism of the superconductivity in high- T_c superconducting cuprates has not yet been clarified, the mechanism based upon dynamical stripe correlations of spins and charges is a probable one. In hole-doped cuprates, it is well known that the dynamical stripe correlations tend to be pinned and statically stabilized by nonmagnetic impurities of Zn. So far, impurity effects on the Cu-spin dynamics and superconductivity have been investigated from the zero-field (ZF) muon-spin-relaxation (μ SR) measurements in the underdoped regime of the hole-doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ with $x \leq 0.15$. It has been found that the Cu-spin fluctuations around Zn exhibit slowing down due to the pinning of the dynamical stripes by Zn, leading to the formation of a static stripe order and the destruction of superconductivity around Zn. This is called a stripe-pinning model. It is clear that the static stripe order competes with the superconductivity, but the dynamical stripe correlations may play an important role in the appearance of superconductivity. If this is the case, similar impurity effects must be observed not only in the underdoped regime but also in a wide range of hole concentration of hole-doped cuprates and also in electron-doped ones. There is another issue in the overdoped regime. That is, a quantum critical point (QCP) has been pointed out to exist at $x \sim 0.19$ in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ by Panagopoulos *et al.*. If this is the case, the mechanism of the high- T_c superconductivity may be different below $x = 0.19$ and above $x = 0.19$.

The main purpose of the present study is to elucidate whether the dynamical stripe correlations

play an important role in the appearance of high- T_c superconductivity or not. For this purpose, I aim at elucidating from the μ SR measurements whether or not the stripe-pinning model holds good even in the overdoped regime of the hole-doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ and in the electron-doped $\text{Pr}_{0.86}\text{LaCe}_{0.14}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{4+\alpha-\delta}$. In addition, I also aim at elucidating whether the QCP really exists at $x \sim 0.19$ in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ or not.

2. Experimental

Two set of polycrystalline samples of hole-doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ with $0.18 \leq x \leq 0.30$ and $0 \leq y \leq 0.10$ and electron-doped $\text{Pr}_{0.86}\text{LaCe}_{0.14}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{4+\alpha-\delta}$ with $0 \leq y \leq 0.05$ were prepared by the ordinary solid-state reaction method. For $\text{Pr}_{0.86}\text{LaCe}_{0.14}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{4+\alpha-\delta}$, as-grown samples were post-annealed in flowing Ar gas of high purity (6N) at 950°C for 10 h in order to remove the excess oxygen at the so-called apical oxygen site. Here, α and δ are the excess oxygen content in the as-grown sample and the removed oxygen content in the post-annealed sample, respectively. All of the samples were checked by the powder x-ray diffraction measurements to be single phase. Both electrical resistivity and magnetic susceptibility were measured to check the quality of the samples and to determine the superconducting transition temperature, T_c . The μ SR measurements were performed at the RIKEN-RAL Muon Facility at the Rutherford-Appleton Laboratory in the UK, at Muon Science Laboratory at the High Energy Accelerator Research Organization in Tsukuba, and at the Paul Scherrer Institute in Switzerland.

3. Results and discussion for the hole-doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$

Figure 1 shows ZF- μ SR time spectra of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ with $0.18 \leq x \leq 0.30$ and $y = 0.03$ at 0.3 K. In $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ samples with $0.18 \leq x \leq 0.27$, an exponential-like depolarization of muon spins has been observed for $y = 0.03$ at 0.3 K, indicating Zn-induced slowing down of the Cu-spin fluctuations. Almost no fast depolarization of muon spins has been observed for $x = 0.30$ where the superconductivity disappears. The present

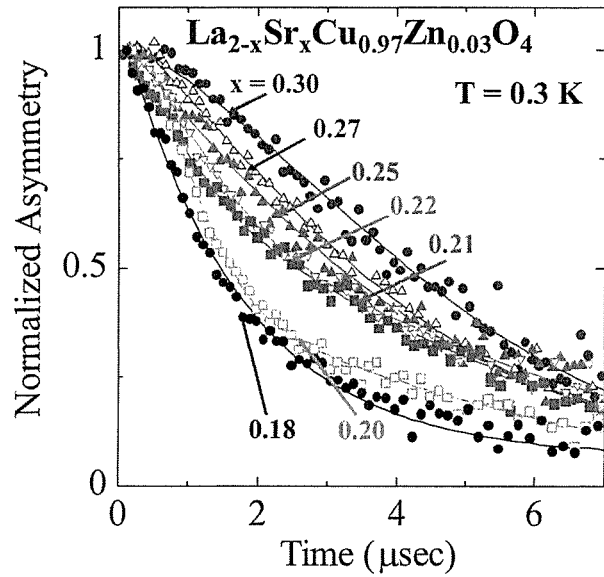


Figure 1 : Typical ZF- μ SR time spectra of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{O}_4$ with $0.18 \leq x \leq 0.30$ at 0.3 K.

results suggest that dynamical stripe correlations exist in a wide range of x where superconductivity appears and that the stripe-pinning model holds good in the overdoped regime as well as in the underdoped regime. The present results also suggest that no QCP exists at $x \sim 0.19$.

4. Results and discussion for the electron-doped $\text{Pr}_{0.86}\text{LaCe}_{0.14}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{4+\alpha-\delta}$

It has been found that, although a fast depolarization of muon spins is observed below 100 K due to the effect of Pr^{3+} moments, the μSR time spectrum increases in the long-time region around 6 μsec with decreasing temperature below 30 K, as shown in Figure 2. This suggests possible slowing down of the Cu-spin fluctuations assisted by Pr^{3+} moments. No Zn-induced slowing down of the Cu-spin fluctuations has been observed for moderately oxygen-reduced samples of $0.04 \leq \delta \leq 0.09$, which is very different from $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$. Possible reasons are as follows: (i) There may be no dynamical stripe correlations of spins and electrons in the electron-doped system. (ii) The effect of Pr^{3+} moments on the μSR spectra may be stronger than that of a small amount of Zn impurities.

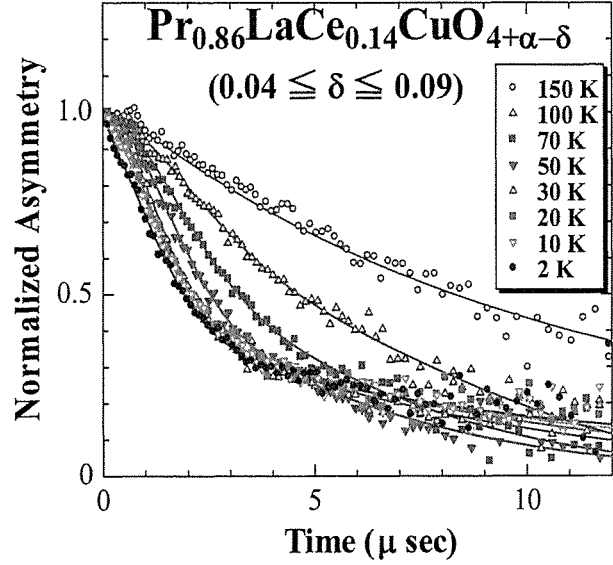


Figure 2 : Typical ZF- μSR time spectra of $\text{Pr}_{0.86}\text{LaCe}_{0.14}\text{CuO}_{4+\alpha-\delta}$ with $0.04 \leq \delta \leq 0.09$.

5. Conclusions

In the present study, following conclusions on the mechanism of the high- T_c superconductivity have been obtained. First, I have found universality of the stripe-pinning model in the whole superconducting regime of the hole-doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, meaning that it is possible that the dynamical stripe correlations play an important role in the appearance of superconductivity in hole-doped cuprates. Secondly, it has been found that no QCP exists not at $x \sim 0.19$. Thirdly, no clear conclusion on the relation between the dynamical stripe correlations and superconductivity has been obtained in electron-doped cuprates. To be conclusive, another electron-doped cuprate system without rare-earth moments should be used for the μSR study.

論文審査結果の要旨

銅酸化物における高温超伝導の発現機構については未だに結論が得られていないが、電荷とスピンの動的ストライプ相関が高温超伝導の発現に効いているとする説は有力な説のひとつである。最近、ホール型高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) のアンダードープ領域 ($x \leq 0.15$) において、Cu サイトを非磁性の Zn で部分置換したときに現れる Cu スピンのダイナミクスの変化をミュオンスピン緩和 (μSR) 実験で調べた研究が報告された。それによれば、少量の Zn 置換によって Cu スピンのゆらぎのスローイングダウンが観測され、それは動的ストライプ相関が Zn によってピン止めされたためと解釈されている。そこで、著者は、動的ストライプ相関が高温超伝導の発現に効いているならば、超伝導が現れている LSCO のオーバードープ領域においても Zn 置換によって同様の結果が得られるであろうと考え、オーバードープ領域において Zn を部分置換した $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ ($0.18 \leq x \leq 0.30$, $0 \leq y \leq 0.10$) の試料を作製し、 μSR 実験を行った。さらに、著者は、電子型高温超伝導体においても動的ストライプ相関の有無を調べるために、Cu サイトを Zn で部分置換した電子型高温超伝導体 $\text{Pr}_{0.86}\text{LaCe}_{0.14}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{4+\alpha\delta}$ ($0 \leq y \leq 0.05$, $0.01 \leq \delta \leq 0.09$) の試料を作製し、 μSR 実験を行った。その結果、ホール型高温超伝導体においては、超伝導が現れる $0.18 \leq x \leq 0.27$ で Zn 置換による Cu スピンのゆらぎのスローイングダウンが観測された。したがって、超伝導が現れるすべてのホール濃度において動的ストライプ相関が存在し、動的ストライプ相関が高温超伝導の発現に効いている可能性が高いと結論した。一方、電子型高温超伝導体においては、Zn 置換に起因する Cu スピンのゆらぎのスローイングダウンは観測されなかった。そのため、電子型高温超伝導体には動的ストライプ相関が存在しない可能性があるが、この物質に含まれる Pr^{3+} モーメントの影響で Zn 置換の効果が検出できなかった可能性も残っており、明確な結論は得られなかった。本論文は、これらの研究成果についてまとめたもので、全編 5 章からなる。

第 1 章は、序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章は、試料作製方法および μSR の測定方法を述べている。

第 3 章は、ホール型高温超伝導体の $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ のオーバードープ領域における μSR の実験結果と考察を述べている。 $0.18 \leq x \leq 0.27$ の $y = 0.03$ において、Cu スピンのゆらぎのスローイングダウンに伴うミュオンスピンの速い緩和を観測している。このことから、LSCO のオーバードープ領域においても動的ストライプ相関が存在し、Zn でピン止めされることによって Cu スピンのゆらぎがスローイングダウンしていると結論している。また、 $x \sim 0.19$ に存在すると言われていた量子臨界点は $x \sim 0.19$ には存在しないと結論している。

第 4 章は、電子型高温超伝導体の $\text{Pr}_{0.86}\text{LaCe}_{0.14}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{4+\alpha\delta}$ における μSR の実験結果と考察を述べている。測定したすべての試料において、100 K 以下で指数関数的なミュオンスピン緩和を観測しているが、これは Pr^{3+} の小さなモーメントの寄与によるものであると考察している。一方、30 K 以下で μSR スペクトルの長時間領域で異常な上昇を観測している。これは、 Pr^{3+} モーメントがアシストした Cu スピンのゆらぎのスローイングダウンによるものであると考察している。期待していた Zn 置換に起因する Cu スピンのゆらぎのスローイングダウンは観測されず、その原因を上記の通り考察している。

第 5 章は、総括であり、本研究の結論と今後の課題を述べている。

以上、要するに本論文は、ホール型高温超伝導体では、超伝導が出現するすべてホール濃度において動的ストライプ相関が存在し、それが高温超伝導の発現に効いている可能性が高いことを指摘し、さらに、LSCO の $x \sim 0.19$ に存在すると言われていた量子臨界点が $x \sim 0.19$ には存在しないことを明らかにしたものである。電子型高温超伝導体については、動的ストライプ相関の有無を明らかにできなかったが、応用物理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

平成 19 年 4 月 4 日

関 係 各 位

工 学 研 究 科 長
(公印省略)

博士学位論文内容要旨及び審査結果要旨（東北大学第 50 号・工学第 50 集
【平成 17 年度授与】）の一部訂正について

先日送付いたしました標記刊行物について、下記のとおり一部誤りがありましたので、
お知らせいたします。

記

工博第 3571 号 応用物理学専攻 RISDIANA（リスディアナ）

正	誤
論文審査委員 (主査) 東北大学教授 小池 洋二 東北大学教授 梶谷 剛 東北大学教授 佐久間 昭正	論文審査委員 (主査) 東北大学教授 梶谷 剛 東北大学教授 佐久間 昭正